

# МАГНИТНЫЕ ПОТЕРИ В СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЕ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Согрин А.И.

ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет»

(национальный исследовательский университет),

г. Челябинск, Российская Федерация, [sogrinai@susu.ac.ru](mailto:sogrinai@susu.ac.ru)

В статье проведен анализ магнитных потерь в электрической машине с дробной зубцовой обмоткой. Для определения потерь использована конечно-элементная модель магнитного поля в электрической машине. Произведена оценка влияния поля якоря и пульсаций магнитного поля воздушного зазора на величину магнитных потерь.

**Ключевые слова** — магнитные потери, вихревые токи, постоянные магниты, дробная зубцовая обмотка

Электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов широко используются в различных приводах. Данный тип машин выглядит весьма привлекательным благодаря приемлемым массогабаритным показателям, значительным удельным мощностям, хорошей управляемости и высокой надежности. В последнее время в связи с развитием силовой электроники и появлением мощных полупроводниковых коммутаторов электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов строятся и на достаточно большие мощности. При этом высокие силовые показатели позволяют выполнить электрическую машину достаточно компактной, что хорошо отвечает требованиям, предъявляемым к энергетическим системам подвижных объектов с автономным питанием. Характерной особенностью режима работы электрической машины в составе трансмиссии транспортного средства является широкий диапазон частот вращения при высоких требованиях к энергетическим показателям.

Кафедрой электромеханики и электромеханических систем Южно-Уральского государственного университета совместно с ОАО «ЧТЗ-Уралтрак» проводятся работы по созданию мощного стартер-генератора для транспортной дизельной установки. Стартер-генератор был спроектирован на базе многополюсной вентильной электрической машины с постоянными магнитами на роторе и дробной зубцовой обмоткой на статоре. Благодаря малой осевой длине, свойственной данному классу машин, удалось удачно вписать электромеханический преобразователь в трансмиссию транспортного средства, обеспечив при этом заданные показатели. Параметры одного из вариантов спроектированного стартер-генератора приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры стартер-генератора

<i>Наименование параметра</i>	<i>Значение параметра</i>
Номинальная мощность в генераторном режиме, кВт	30
Отдаваемая мощность, начиная с частоты вращения 1550 об/мин, кВт	60
Максимальный КПД	0,95
Пусковой момент при температуре окружающей среды минус 25°C, Нм	1250
Номинальный момент, Нм	640
Номинальная механическая мощность при температуре окружающей среды минус 25°C, кВт	10
Число полюсов индуктора	34
Число пазов статора	36
Наружный диаметр, мм	538
Внутренний диаметр, мм	365
Осевая длина активной части, мм	105
Приблизительная масса стартер-генератора, кг	56

В связи с достаточно высокими частотами вращения и большим числом полюсов ротора серьезную проблему составили магнитные потери в сердечниках электрической машины. Причем, как показал наш опыт, существенные потери имеют место не только в сердечнике статора, но и в роторе машины.

Средства снижения магнитных потерь и возникающего в связи с этим нагрева хорошо известны: это шихтовка магнитопроводов, применение высококачественных легированных тонколистовых сталей, жидкостное охлаждение сердечников через специальные каналы. Однако эти меры хорошо подходят лишь для сердечника неподвижного статора. На роторе рассматриваемой машины расположены массивные полюсы из магнитотвердого материала, организация жидкостного охлаждения ротора также трудновыполнимая задача. Проблема усугубляется еще и тем, что некоторые магнитотвердые сплавы, например, широко используемый в настоящее время NdFeB, чрезвычайно чувствительны к нагреву, их точка Кюри располагается вблизи 200°C. Хотя электрическая проводимость неодимовых магнитов

сравнительно невелика ( $6,25 \cdot 10^5$  См/м, для сравнения электрическая проводимость стали марки Ст3 составляет  $5 \cdot 10^6$  См/м), возникающие вихревые токи способны разогреть магниты и тем существенно снизить их энергетические показатели. Стоит заметить, что менее чувствительные к нагреву сплавы гораздо дороже.

Анализ отечественных и зарубежных публикаций показал, что проблема широко обсуждается, особенно зарубежными коллегами [1], [2]. Оценка степени серьезности проблемы и выработка мер по устранению нежелательных последствий возможны после детального изучения источников указанных потерь.

Источниками магнитных потерь в сердечнике статора рассматриваемой машины являются перемагничивание материала и вихревые токи, возникающие при изменении магнитного поля, замыкающегося через магнитопровод. Расчет магнитных потерь в сердечнике статора вентильной машины может быть осуществлен по хорошо известным соотношениям для синхронных машин [3]:

где  $k_{\text{да}}$  — коэффициент, учитывающий технологическое увеличение потерь,  $p_{1/400}$  — удельные потери в материале при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 400 Гц, Вт/кг;  $B$  — средняя индукция в магнитопроводе, Тл;  $m$  — масса магнитопровода, кг;  $f$  — частота перемагничивания, Гц.

Магнитные потери в массивных полюсах синхронных электрических машин возникают вследствие пульсаций магнитного поля в зазоре электрической машины при перемещении зубчатого статора относительно полюсов. Данные потери определяются соотношением [3]:

где  $B_0 = B_{\delta 0}(k_{\delta I} - I)$ ;  $B_{\delta 0}$  — индукция в зазоре при  $E = U_{\text{ном.ф}}$ , Тл;  $k_{\delta I}$  — коэффициент воздушного зазора;  $k_0$  — коэффициент, зависящий от исполнения полюсов;  $\alpha$  — коэффициент полюсного перекрытия;  $z_I$  — число зубцов статора;  $\tau$  — полюсное деление, м;  $l_I$  — активная длина статора, м;  $t_{zI}$  — зубцовое деление статора, м;  $n$  — частота вращения, об/мин;  $p$  — число пар полюсов ротора. Данные потери во многом определяются конфигурацией пазово-зубцовой зоны машины.

Кроме того, как в сердечнике статора, так и в сердечнике ротора при нагрузке машины возникают добавочные потери, являющиеся следствием возникновения вихревых токов, обусловленных высшими гармониками магнитного поля якоря. Данные потери не поддаются точному аналитическому учету и могут быть приблизительно оценены в долях от подводимой мощности для двигателей и полезной мощности для генераторов. Для машин до 1000 кВА эти потери принимают равными 0,5%, для машин более 1000 кВА — 0,25–0,4% [3].

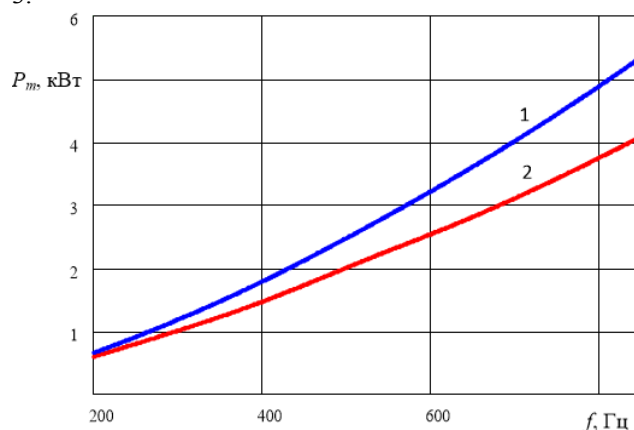
Описанная методика расчета магнитных потерь в основном учитывает их зависимость от поля индуктора, влияние поля якоря учитывается лишь косвенно.

Более точный учет возникающих потерь возможен при численном решении полевой задачи, учитывающем нелинейности характеристик материалов и неравномерность магнитного поля в участках магнитной системы. Для исследования электромагнитных процессов в разработанных электрических машинах были составлены модели электромагнитного поля в их активных объемах. Моделирование проводилось с использованием программных средств фирмы ANSYS. При составлении математических моделей учитывались нелинейность магнитных свойств ферромагнетиков, влияние реакции якоря и вихревых токов, электрическое сопротивление материалов магнитопроводов и постоянных магнитов, шихтовка сердечника статора.

Электрическая машина моделировалась в режиме синхронного генератора, работающего на симметричную активную нагрузку, что позволило сопоставить результаты численного моделирования с результатами расчета по аналитическим выражениям, приведенным выше. Моделирование проводилось при номинальном токе якоря, соответствующем номинальному значению отдаваемой мощности генератора 30 кВА. Результаты расчета потерь по аналитическим выражениям и при математическом моделировании приведены на рис.1. Поскольку при аналитическом расчете не было возможности отдельно учесть потери в роторе, сравнение проводилось по суммарным магнитным потерям.

Анализ результатов показал, что расчет по аналитическим выражениям хорошо совпадает с результатами полевого эксперимента лишь при сравнительно малых частотах перемагничивания сердечника. По мере увеличения частоты вращения ротора расхождение в результатах расчета возрастало, максимальное расхождение составило около 25%.

Зависимости суммарных магнитных потерь в машине от тока якоря и от частоты перемагничивания, полученные на полевой модели, приведены на рис. 2, 3.



1 — результаты аналитического расчета  
2 — результаты полевого расчета

Рис. 1. Полные магнитные потери в стартер-генераторе

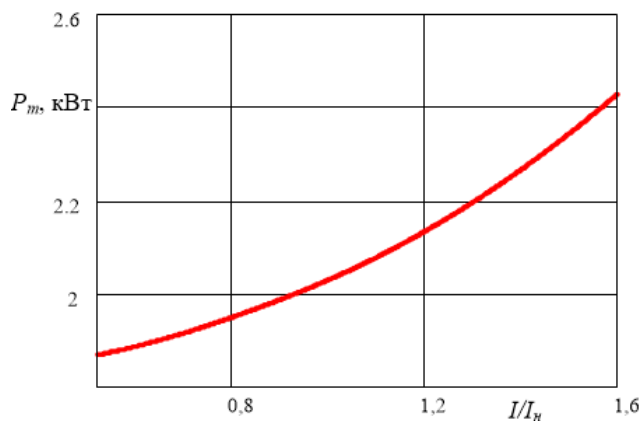


Рис. 2. Зависимость полных магнитных потерь в стартер-генераторе от тока якоря

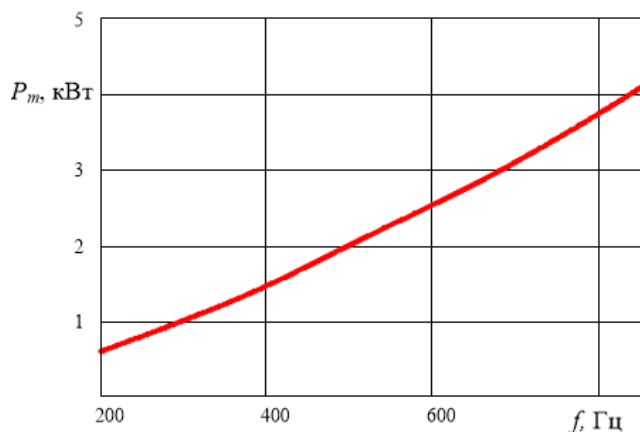


Рис. 3. Зависимость полных магнитных потерь в стартер-генераторе от частоты перемагничивания

Расчет на полевой модели позволил отдельно оценить магнитные потери в роторе и статоре электрической машины. Соответствующие зависимости приведены на рис. 4, 5.

Согласно полученным данным потери в статоре слабо зависят от тока якоря и в основном определяются полем индуктора. Действительно, мдс индуктора при номинальной нагрузке существенно превосходит мдс реакции якоря, в силу чего влияние последней нивелируется.

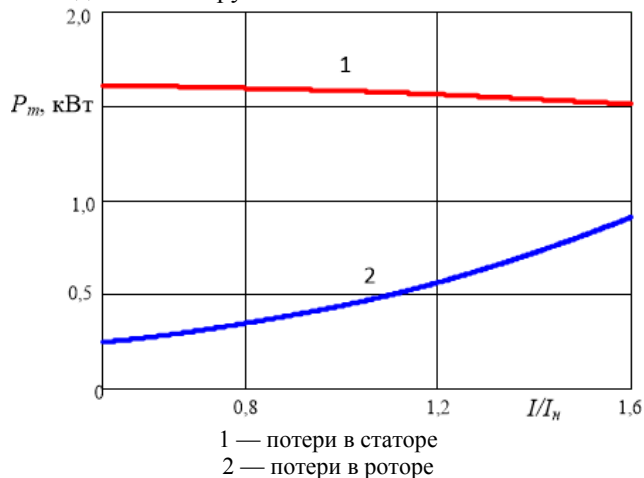


Рис. 4. Зависимость магнитных потерь в сердечниках стартер-генератора от тока якоря

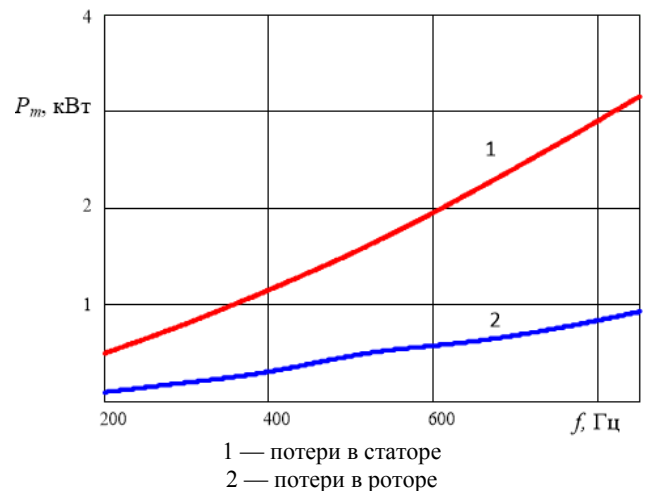


Рис. 5. Зависимость магнитных потерь в сердечниках стартер-генератора от частоты перемагничивания

Снижение потерь в статоре при увеличении тока якоря можно объяснить размагничивающим действием реакции якоря, вследствие чего уменьшается суммарное поле в машине и связанные с ним магнитные потери.

Потери в роторе существенно возрастают при увеличении тока якоря, поскольку основным источником вихревых токов в роторе является поле высших гармоник якоря, вращающихся несинхронно с ротором.

Как потери в статоре, так и потери в роторе существенно зависят от частоты перемагничивания, так как при возрастании частоты вращения ротора увеличивается и частота перемагничивания статора полем индуктора, и частота токов, протекающих по обмоткам якоря и создающих его намагничивающую силу. В целом можно отметить, что основными магнитными потерями являются потери в статоре. В тоже время, потери в роторе при высоких частотах вращения и значительных токовых нагрузках могут достигать значительной величины (в нашем случае более 1 кВт).

Для уточнения относительного вклада различных источников в общие магнитные потери был проведен дополнительный эксперимент на полевой модели, в ходе которого по обмотке якоря пропускались симметричные синусоидальные токи от внешних источников, а коэрцитивная сила магнитов принималась равной нулю. В результате потери в статоре при отсутствии поля индуктора составили не более 8% от потерь при полном поле, что еще раз подтвердило слабую зависимость магнитных потерь в статоре от поля якоря. Результаты данного эксперимента для потерь в роторе представлены на рис. 6 совместно с результатами эксперимента с нормально намагниченными магнитами.

В соответствии с приведенными данными потери от поля якоря при токе равном половине номинального составляют примерно 40% от полных потерь в роторе. При токах близких или больших номинального потери в роторе обусловлены в основном полем реакции якоря.

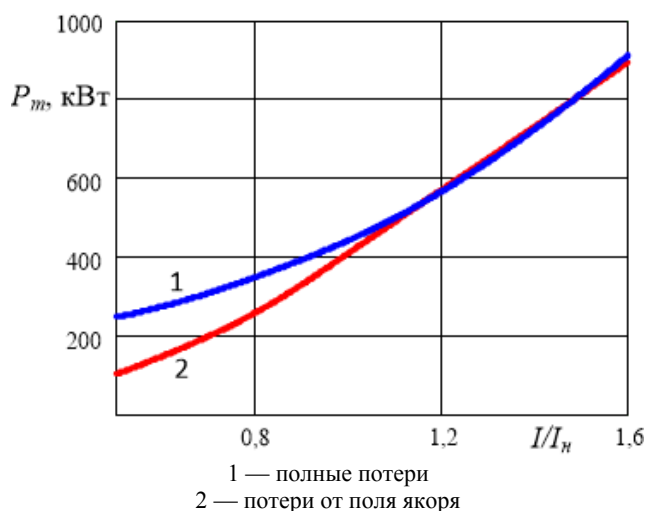


Рис. 6. Магнитные потери в роторе стартер-генератора

Гармонический анализ поля якоря электрической машины с дробной зубцовой обмоткой произведен в работе [4]. Согласно проведенным исследованиям обмоткой якоря таких машин создается магнитное поле, содержащее целый спектр гармоник, две из которых, имеющие зубцовый порядок, являются основными. Эти гармоники имеют близкие амплитуды и вращаются в разные стороны. Номер основной рабочей гармоники определяется числом полюсов индуктора.

При разложении кривой мдс дробной зубцовой обмотки в ряд Фурье на периоде обмотки обмоточный коэффициент для  $v$ -ых гармоник намагничивающей силы определяется выражениями:

$$k_{ov} = k_{pv} k_{yv},$$

$$k_{pv} = \frac{\sin(q(\pi - (\delta)/2))}{q \sin((\pi - (\delta)/2))},$$

$$k_{yv} = \sin((\pi/z_1))$$

где  $k_{ov}$  — обмоточный коэффициент для гармоники мдс порядка  $v$ ,  $k_{pv}$  — коэффициент распределения обмотки для гармоники мдс порядка  $v$ ,  $q$  — число катушек в одной фазной зоне,  $\delta$  — сдвиг между осями соседних зубцов статора,  $k_{yv}$  — коэффициент укорочения обмотки для гармоники мдс порядка  $v$ ,  $z_1$  — число зубцов статора, приходящихся на один период обмотки. В кривой мдс присутствуют только нечетные гармоники, причем гармоники кратные трем при соединении обмотки в звезду взаимно уничтожаются. Обмоточные коэффициенты для рассматриваемой обмотки при  $z=36$ , а так-же относительные амплитуды гармоник ее мдс приведены в таблице 2. Как видно из данных таблицы, основной гармоникой рассматриваемой обмотки может быть либо гармоника 17, либо 19. В нашем случае число полюсов индуктора было принято равным 34, что делает основной гармоникой с номером 17. Эта гармоника вращается синхронно с ротором и участвует в создании электромагнитного момента.

Таблица 2  
Гармонический состав намагничивающей силы якоря дробной зубцовой обмотки при  $z=36$

№ гармоники	$k_{ov}$	$F^*$
1	0,007	0,118
5	0,039	0,126
7	-0,058	0,135
11	-0,119	0,175
13	0,179	0,223
17	0,953	0,908
19	0,953	0,812
23	0,179	0,126
25	-0,119	0,077
29	-0,058	0,033

Остальные гармоники в создании полезных моментов участия не принимают, вращаются асинхронно с ротором и создают, таким образом, магнитные потери в нем.

Как показывают проведенные исследования, магнитные потери в электрических машинах с постоянными магнитами могут представлять серьезную проблему. Особенно это касается быстроходных машин и машин, работающих в предельных режимах с существенной токовой нагрузкой якоря. Потери в статоре машины могут быть снижены традиционными средствами, кроме того, возможна организация жидкостного охлаждения сердечника статора.

Для снижения потерь в роторе возможно изготовление его сердечника шихтованным. Однако это не решит проблему вихревых токов в постоянных магнитах. В работе [1] предлагается выполнять полюсы сегментированными. Авторы указывают, что для снижения потерь до приемлемого уровня достаточно разбить каждый магнит на 2–4 сегмента. Это усложнит технологию изготовления электрической машины и увеличит ее цену, однако других способов снижения указанных потерь пока не предложено.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Toda Hiroaki, Wang Jiabin, Howe David Analysis of Motor Loss In Permanent Magnet Brushless Motors // JFE Technical Report. — 2005. №6, pp. 18–23.
2. Adel Bettayeb, Robert Kaczmarek, Jean-Claude Vannier Analytical Estimation of Rotor Loss Due to Stator Slotting of Synchronous PM Machines // World Academy of Science, Engineering and Technology. — 2010. №42, pp. 193–199.
3. Проектирование электрических машин : Учеб. для вузов. — В 2-х кн. : Кн. 2. / И. П. Копылов, Б. К. Клоков и др. — 2-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1993. — 384 с.
4. Шевченко, А.Ф., Честюнина, Т.В. Анализ магнитодвижущих сил дробных зубцовых обмоток электрических машин / А.Ф. Шевченко, Т.В. Честюнина // Электротехника, 2009. №12. — С. 3–7.